

配电系统谐波治理对工业用户综合节电效果的贡献分析

高梓轩

1.百色学院 广西 百色 530000

2.广东省瑞达绿能科技有限公司 广东 江门 529200

【摘要】：随着工业生产自动化水平提升，大量非线性负载在工业配电系统中的应用日益广泛，导致谐波污染问题愈发突出。谐波不仅干扰配电系统稳定运行，还会增加电能损耗，降低用电效率。本文结合工业用户配电系统运行特点，分析谐波的产生机制与危害，阐述常见谐波治理技术的原理及适用场景，通过实际案例与数据对比，量化分析谐波治理对工业用户综合节电的贡献，为工业用户优化用电结构、降低能耗提供理论与实践参考。

【关键词】：配电系统；谐波治理；工业用户；节电效果；能耗优化

DOI:10.12417/3041-0630.26.02.001

1 引言

工业领域是能源消耗的核心板块，其用电成本在生产总成本中占比颇高。在“双碳”目标背景下，工业用户节能降耗、提升用电效率的需求愈发迫切。当前，工业配电系统中变频器、电弧炉、整流设备等非线性负载的占比不断提高，这类设备运行时向电网注入大量谐波电流，导致电压波形畸变。谐波的存在打破了配电系统的正弦稳态运行状态，引发线路损耗增加、设备寿命缩短、电能质量下降等一系列问题，间接加剧了能源浪费。谐波治理作为改善电能质量的关键手段，不仅能保障配电系统安全稳定运行，还能通过降低谐波损耗实现显著的节电效果^[1]。然而，部分工业用户对谐波治理的节电价值认知不足，认为其投入成本高、回报周期长，忽视了谐波带来的隐性能耗损失。本文通过深入分析谐波治理与综合节电的内在关联，结合实际工程案例，量化评估谐波治理的节电贡献，为工业用户开展谐波治理工作提供科学依据。

2 工业配电系统谐波的产生与危害

2.1 谐波的产生机制

谐波是指频率为基波频率整数倍的正弦波分量，工业配电系统中的谐波主要由非线性负载产生。当电流通过非线性负载时，其电压与电流的关系不再遵循线性规律，导致电流波形发生畸变，经傅里叶级数分解后，除基波分量外，其余频率的分量即为谐波。工业领域常见的谐波源主要分为三类，一是电力电子设备，包括变频器、整流器、逆变器等，这类设备广泛应用于电机调速、电化学加工等场景，其运行时通过开关动作改变电流相位与幅值，是谐波的主要来源^[2]；二是电弧类设备，如电弧炉、电弧焊机等，电弧的非线性特性导致电流波形严重畸变，产生大量高次谐波；三是其他非线性负载，如荧光灯、变压器等，这类设备在轻载或启动时会呈现非线性特性，产生少量谐波。

2.2 谐波对工业配电系统的危害

谐波对工业配电系统的危害贯穿于发电、输电、配电及用电全环节，不仅影响系统稳定运行，还会增加电能损耗，降低用电效率。

(1) 增加线路与变压器损耗：谐波电流在导线中流动时，会产生额外的铜损，其损耗功率与频率的平方成正比，高次谐波的存在会显著增加线路损耗。同时，谐波会导致变压器铁芯磁密畸变，增加铁损，还会使变压器绕组产生附加损耗，降低变压器的运行效率，缩短其使用寿命。

(2) 干扰敏感设备正常运行：工业生产中的精密仪器、自动化控制系统对电能质量要求较高，谐波会导致这类设备信号失真、控制精度下降，甚至出现故障停机。例如，谐波会干扰变频器的输出频率，影响电机的调速性能，导致生产效率降低；还会使计量仪表出现误差，造成电费结算不准确。

(3) 引发功率因数降低与无功损耗增加：谐波会导致系统功率因数下降，使无功功率占比增加，进而增加输电线路的无功损耗，降低电网的输电能力。此外，谐波还可能引发并联谐振或串联谐振，使局部电网或低压配电系统的谐波幅值放大，加剧设备损坏与能耗增加的问题。

3 工业配电系统常见谐波治理技术

谐波治理的核心目标是抑制谐波源产生的谐波，或阻断谐波的传播路径，降低谐波对配电系统的影响^[3]。工业用户常用的谐波治理技术主要包括无源滤波技术、有源滤波技术及混合滤波技术，各类技术的原理、特点及适用场景存在显著差异，用户需结合自身负载特性与谐波污染程度合理选择。

(1) 无源滤波技术：无源滤波技术通过由电容、电感、电阻组成的滤波装置，利用其阻抗特性对特定频率的谐波形成低阻抗通路，使谐波电流通过滤波装置消耗或回流，从而减少

流入配电系统的谐波分量。无源滤波装置分为单调谐滤波器、双调谐滤波器及高通滤波器三类,其中单调谐滤波器适用于抑制单一频率的谐波,双调谐滤波器可同时抑制两种频率的谐波,高通滤波器则主要用于抑制高次谐波。无源滤波技术具有结构简单、成本低、运行可靠等优点,适合谐波含量相对稳定、谐波频率明确的工业用户,如电化学工厂、电弧炉钢厂等。但其存在滤波特性固定、无法适应负载变化、可能与电网发生谐振等缺点,在谐波成分复杂的场景中应用效果有限。

(2) 有源滤波技术:有源滤波技术通过检测电网中的谐波电流,利用电力电子器件产生与谐波电流幅值相等、相位相反的补偿电流,抵消电网中的谐波分量,实现谐波治理。有源滤波装置具有响应速度快、滤波精度高、可自适应负载变化等优点,能够有效抑制多种频率的谐波,还可同时补偿无功功率与不平衡电流,改善电能质量的综合效果显著。有源滤波技术适用于谐波成分复杂、负载波动大的工业用户,如汽车制造厂、电子加工厂等。但其成本较高、运行维护难度较大,对技术人员的专业水平要求较高,限制了其在部分中小工业用户中的应用。

(3) 混合滤波技术:混合滤波技术结合了无源滤波与有源滤波的优点,通过无源滤波装置承担主要的谐波治理任务,尤其是抑制幅值较大的低次谐波,降低治理成本;通过有源滤波装置补偿无源滤波装置的不足,抑制高次谐波与负载波动产生的谐波,提升滤波精度。混合滤波技术兼顾了治理效果与经济性,适用于大多数工业用户,尤其是谐波含量大、成分复杂的大型工业企业。

4 谐波治理对工业用户综合节电效果的贡献分析

谐波治理对工业用户的综合节电效果主要体现在降低线路损耗、减少变压器损耗、提高设备运行效率及优化无功功率补偿四个方面。本文结合理论分析与实际案例,量化评估各环节的节电贡献,明确谐波治理的经济价值。

(1) 降低线路损耗的节电贡献:工业配电线路的损耗主要包括基波电流产生的损耗与谐波电流产生的附加损耗。根据焦耳定律,线路损耗功率与电流的平方成正比,设基波电流为 I_1 ,谐波电流总有效值为 I_h ,则线路总损耗 $P=I_1^2 R+I_h^2 R=(I_1^2+I_h^2)R$,其中 R 为线路电阻。谐波治理后,谐波电流 I_h 降低,线路总损耗随之减少,减少的损耗即为节电功率。

以某大型机械加工厂为例,其配电线路电阻 $R=0.05\Omega$,治理前线路基波电流 $I_1=800A$,谐波电流总有效值 $I_h=240A$,线路总损耗 $P_1=(800^2+240^2)\times 0.05=34880W$ 。采用混合滤波技术治理后,谐波电流总有效值降至 $I_h'=48A$,线路总损耗 $P_2=(800^2+48^2)\times 0.05=32112W$,单日节电功率为 $34880-32112=2768W$,年节电总量约为 $2768\times 24\times 365\div 1000$

$\approx 24240kWh$,按工业电价 0.8 元/ kWh 计算,年节约电费约 19392 元。

(2) 减少变压器损耗的节电贡献:变压器是工业配电系统的核心设备,其损耗主要包括铁损与铜损。谐波会同时增加变压器的铁损与铜损:一方面,谐波电压会导致变压器铁芯磁密畸变,增加磁滞损耗与涡流损耗,即铁损增加;另一方面,谐波电流会在变压器绕组中产生附加铜损,且高次谐波的集肤效应会进一步增大绕组电阻,加剧铜损。变压器的总损耗在谐波治理后会显著降低,其节电贡献可通过治理前后的损耗对比计算。以某化工企业的 $1000kVA$ 变压器为例,治理前变压器的铁损为 $1200W$,铜损为 $6000W$,其中谐波导致的附加铁损为 $200W$,附加铜损为 $1500W$ 。采用有源滤波技术治理后,谐波附加铁损降至 $50W$,附加铜损降至 $300W$,变压器总损耗减少 $200+1500-50-300=1350W$ 。单日节电功率为 $1350W$,年节电总量约为 $1350\times 24\times 365\div 1000\approx 11826kWh$,即该单台 $1000kVA$ 变压器年节约电费约 9461 元。

(3) 提高设备运行效率的节电贡献:工业生产中的电机、水泵、风机等设备在谐波环境下运行时,其内部会产生附加损耗,导致运行效率降低。例如,谐波会使电机的定子铜损、转子铜损及铁损增加,还会导致电机转矩脉动,增加机械损耗,降低电机的输出功率与效率。谐波治理后,设备运行的电能质量改善,附加损耗减少,运行效率提升,从而实现节电。例如某纺织厂拥有 50 台功率为 $55kW$ 的异步电机,治理前电机平均运行效率为 82% ,受谐波影响,每台电机的附加损耗为 $2.2kW$ 。采用无源滤波技术治理后,电机附加损耗降至 $0.44kW$,平均运行效率提升至 88% 。单台电机单日节电功率为 $2.2-0.44=1.76kW$, 50 台电机单日总节电功率为 $88kW$,年节电总量约为 $88\times 24\times 365=770880kWh$,年节约电费约 616704 元。

(4) 优化无功功率补偿的节电贡献:谐波会干扰无功功率补偿装置的正常运行,导致补偿电容过流、发热,甚至损坏,降低无功补偿效果。无功功率补偿不足会使系统功率因数降低,增加输电线路的无功损耗,降低电网的输电能力。谐波治理后,无功功率补偿装置可稳定运行,功率因数提升,无功损耗减少,实现间接节电。例如某钢铁厂治理前功率因数为 0.78 ,受谐波影响,无功补偿装置投切频繁,补偿效果不佳,线路无功损耗为 $120kW$ 。治理后功率因数提升至 0.95 ,无功补偿装置稳定运行,线路无功损耗降至 $30kW$,单日节电功率为 $90kW$,年节电总量约为 $90\times 24\times 365=788400kWh$,年节约电费约 630720 元。

(5) 综合节电效果汇总:结合上述案例,将各环节的节电贡献汇总如下表所示。从表中可以看出,谐波治理不仅能直接降低线路与变压器的损耗,还能通过提高设备运行效率与优化无功补偿实现显著节电,综合节电效果显著。对于大型工业

用户，年节电总量可达数百万千瓦时，节约电费数十万元，投资回报周期通常在2-3年。

表1 以往工业节电项目平均节电效果评估

用户类型	节电环节	年节电总量 (kWh)	年节约电费 (元)
机械加工厂	降低线路损耗	24240	19392
化工企业	减少变压器损耗	11826	9461
纺织厂	提高设备运行效率	770880	616704
钢铁厂	优化无功功率补偿	788400	630720

(6) 谐波治理的经济可行性分析：工业用户开展谐波治理需投入一定的设备采购、安装及维护成本，其经济可行性主要取决于治理成本与节电收益的对比。以某大型汽车零部件制造厂为例，该企业谐波污染严重，采用混合滤波技术进行治理，治理方案如下。治理成本包括2套有源滤波装置（单价45万元）、3套无源滤波装置（单价8万元），设备采购成本共计 $45 \times 2 + 8 \times 3 = 114$ 万元；安装调试费用12万元，年维护费用5万元，按设备使用寿命10年计算，总治理成本为 $114 + 12 + 5 \times 10 = 176$ 万元。治理后，线路损耗年节电32000kWh，变压器损耗年节电18000kWh，设备运行效率提升年节电920000kWh，无功补偿优化年节电850000kWh，年总节电总量为 $32000 + 18000 + 920000 + 850000 = 1820000$ kWh，年节约电费为 $1820000 \times 0.8 = 1456000$ 元。经计算，该企业谐波治理的投资回报周期为 $1760000 \div 1456000 \approx 1.21$ 年，远低于设备使用寿命，且治理后还能减少设备故障停机损失、延长设备使用寿命，间接提升企业的生产效率与经济效益，经济可行性显著。

5 相关建议

(1) 加强谐波检测与评估：工业用户应建立常态化的谐波检测机制，结合生产负荷周期特点，每季度至少开展一次全面检测，在生产线启停、负载调整等关键节点增加检测频次。检测过程中需选用精度符合国家标准谐波分析仪，重点监测母线电压、关键负载电流的谐波畸变率，明确各次谐波的幅值、相位及谐波源归属。同时，建立谐波数据档案，对检测数据进行纵向对比与趋势分析，精准识别谐波污染的变化规律，结合生产计划预判谐波污染风险。此外，可委托第三方专业机构开展周期性专项评估，结合行业标准与企业实际生产需求，制定科学合理的治理目标，为后续治理方案的设计提供精准的数据

参考文献：

[1] 王媚芳.空分低压配电系统谐波治理措施实例分析[J].仪表技术,2022,(04):54-56.
 [2] 付明立.浅谈配电系统中的谐波治理设计[J].电子世界,2017,(04):140-141.
 [3] 朱生杰,王莉娟.动力厂低压配电系统谐波治理项目改造规划与设计[J].通讯世界,2015,(17):176.

支撑与理论依据。

(2) 合理选择治理技术：工业用户需结合自身核心需求进行技术选型，选型前需全面梳理负载特性，包括非线性负载的类型、容量、运行工况及谐波输出规律，同时兼顾企业的经济预算与长期发展规划。对于谐波含量稳定、频率集中的中小工业用户，如小型电化学加工厂、单一生产线制造厂，可优先选用无源滤波技术，根据主要谐波频率定制滤波装置参数，在保障治理效果的同时控制投入成本。对于负载波动大、谐波成分复杂的大型工业企业，如汽车整车制造厂、电子元件产业园，建议采用混合滤波技术，通过无源滤波模块抑制主要低次谐波，搭配有源滤波模块精准补偿高次谐波与动态谐波，实现治理效果与经济性的平衡。此外，选型过程中还需考量设备的兼容性、扩容性及占地面积，优先选择符合行业标准、售后服务完善的产品，并开展小规模试点测试，验证技术方案的可行性后再全面推广。

(3) 重视治理后的运行维护：工业用户应建立健全谐波治理设备全生命周期管理机制，制定详细的日常巡检、定期维护及故障处置流程。日常巡检需重点关注滤波装置的运行参数、散热情况及异响、异味等异常现象，记录设备的投入率、补偿效果等关键数据；定期维护需按照设备说明书要求，对电容、电感、功率模块等核心部件进行检测，及时更换老化、损坏部件，清理设备内部灰尘，确保设备性能稳定。同时，搭建设备故障预警系统，利用物联网技术实时监测设备运行状态，一旦发现参数异常立即发出预警并推送处置建议。加强技术人员专业培训，定期组织开展谐波治理技术、设备操作规范、故障排查方法等方面的培训，鼓励技术人员参与行业交流活动，提升专业素养。此外，与设备供应商签订长期维护协议，明确维护责任与响应时限，确保设备出现故障时能得到及时有效的技术支持。

6 结论

谐波治理对工业用户的综合节电效果显著，其节电贡献主要来自降低线路损耗、减少变压器损耗、提高设备运行效率及优化无功功率补偿四个环节。通过合理选择谐波治理技术，工业用户可实现年节电数万至数百万千瓦时，投资回报周期通常在1-3年，兼具节能效益与经济效益。此外，谐波治理还能改善电能质量，保障配电系统稳定运行，减少设备故障损失，为工业用户的绿色低碳发展奠定基础。